

**В. О. ПОТАПОВ, С. М. КОСТЕНКО, І. П. ПЕДОРІЧ****ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ТА АПАРАТІВ ІНФРАЧЕРВОНОГО ЖАРЕННЯ М'ЯСНИХ НАПІВФАБРИКАТІВ**

За використання програмного комплексу Vensim, який реалізує системно-динамічну технологію потокового типу, виконано імітаційне моделювання процесу інфрачервоного жарення м'ясних напівфабрикатів та комплексної оцінки апарату інфрачервоного жарення. Використання імітаційного моделювання уможливило повну та якісну оцінку впливу таких факторів, як тип сировини, потужність апарата та наявність відбивача променевого потоку на характер та значення вихідних функцій, тобто готовності продукту, а також продуктивності та витратності обладнання. Досліджувався вплив теплофізичних характеристик м'ясного напівфабриката та потужності випромінювача на середню температуру внутрішніх шарів продукту, а також вплив наявності в апараті відбивача променевого потоку на продуктивність, енергоємність, металомісткість та питому витратність апарата. Профіль відбивача забезпечує рівномірне опромінення опуклого перерізу м'ясного напівфабриката. Використання в апараті відбивача променевого потоку призводить до готовності свинини за 8.7 хвилин або яловичини – за 10.6 хвилин, збільшення продуктивності на 60 %, скорочення енергоємності на 60 %, металомісткості на 40 %, питомої витратності на 124 %. Експериментування з імітаційними моделями процесів та апаратів інфрачервоного жарення надає системне підґрунтя для їх інтенсифікації та оптимізації.

**Ключові слова:** імітаційне моделювання, інфрачервоне жарення, м'ясний напівфабрикат, відбивач.

**В. А. ПОТАПОВ, С. Н. КОСТЕНКО, И. П. ПЕДОРІЧ****ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ И АППАРАТОВ ИНФРАКРАСНОЙ ЖАРКИ МЯСНЫХ ПОЛУФАБРИКАТОВ**

С использованием программного комплекса Vensim, который реализует системно-динамическую технологию потокового типа, выполнено имитационное моделирование процесса инфракрасной жарки мясных полуфабрикатов и комплексной оценки аппарата инфракрасной жарки. Использование имитационного моделирования позволяет полно и качественно оценить влияние таких факторов, как тип сырья, мощность аппарата и наличие отражателя лучистого потока на характер и значение выходных функций, то есть готовности продукта, а также производительности и затратности оборудования. Исследовалось влияние теплофизических характеристик мясного полуфабриката и мощности излучателя на среднюю температуру внутренних слоев продукта, а также влияние наличия в аппарате отражателя лучистого потока на производительность, энергоёмкость, металлоёмкость и удельную затратность аппарата. Профиль отражателя обеспечивает равномерное облучение выпуклого сечения мясного полуфабриката. Использование в аппарате отражателя лучевого потока приводит к готовности свинины за 8.7 минут, говядины - за 10.6 минут, увеличение производительности на 60 %, сокращение энергоёмкости на 60 %, металлоёмкости на 40 %, удельной затратности на 124 %. Экспериментирования с имитационными моделями процессов и аппаратов инфракрасной жарки даёт системную основу для их интенсификации и оптимизации.

**Ключевые слова:** имитационное моделирование, инфракрасная жарка, мясной полуфабрикат, отражатель.

**V. POTAPOV, S. KOSTENKO, I. PEDORYCH****SIMULATION MODELING OF PROCESSES AND APPARATUSES FOR INFRARED FRYING OF MEAT SEMI-FINISHED PRODUCTS**

Using the Vensim software package, which implements a system-dynamic flow-type technology, simulation of the process of infrared frying of meat semi-finished products and a comprehensive assessment of the infrared frying apparatus was performed. The use of simulation modeling allows you to fully and qualitatively assess the influence of such factors as the type of raw material, the power of the apparatus and the presence of a radiant flux reflector on the nature and value of output functions, that is, product readiness, as well as equipment productivity and cost. The influence of the thermophysical characteristics of the meat semi-finished product and the power of the radiator on the average temperature of the inner layers of the product, as well as the effect of the presence of a radiant flux reflector in the apparatus on productivity, energy intensity, metal consumption and specific expenses of the apparatus were investigated. The reflector profile provides uniform irradiation of the convex section of the meat semi-finished product. The use of a reflector beam in the apparatus leads to readiness of pork in 8.7 minutes, beef in 10.6 minutes, an increase in productivity by 60 %, a reduction in energy consumption by 60 %, metal consumption by 40 %, and specific expenses by 124 %. Experimenting with simulation models of infrared frying processes and apparatuses provides a system basis for their intensification and optimization.

**Keywords:** simulation, infrared frying, meat semi-finished product, reflector.

**Постановка проблеми.**

Підвищення продуктивності інфрачервоного обладнання харчових виробництв зі зменшенням його витратності є безумовно актуальним завданням.

**Аналіз стану проблеми.**

Існуючі дослідження пропонують різні моделі жарення, орієнтовані на інженерні розрахунки та аналітичне моделювання [1, 2], проте задачу оптимізації інфрачервоного обладнання треба розглядати і вирішувати в рамках системного підходу.

**Метою дослідження** було створення імітаційних моделей процесів та апаратів інфрачервоного жарен-

ня м'ясних напівфабрикатів за використання програмного комплексу Vensim [3, 4].

**Результати моделювання.** На рис. 1 наведено імітаційну модель кінетики температури м'ясних напівфабрикатів під час інфрачервоного жарення [5] зі зміною сировини та випромінювача. Для верифікації результатів реальне жарення здійснювалося в апараті АРЖМ-0.07-1 [6, 7].

Нехай питома теплоємність яловичини становить 3500 Дж/(кг °C), свинини 3000 Дж/(кг °C); коефіцієнт теплопровідності яловичини становить 0.5 Вт/(м<sup>2</sup> °C), свинини 0.4 Вт/(м<sup>2</sup> °C). Потужність випромінювача

становить 1000 Вт. За температури готовності 75 °С свинина готова через 521 с (8.7 хв), яловичина готова через 635 с (10.6 хв) (рис. 2, 3), що відповідає реальному жаренню.

Потужність випромінювача становить 1000 Вт та 750 Вт. За температури готовності 75 °С яловичина готова через 635 с (10.6 хв) за потужності 1000 Вт, яловичина готова через 861 с (14.4 хв) за потужності 750 Вт (рис. 4, 5), що відповідає реальному жаренню.

Шляхом імітаційного моделювання виконаємо комплексну оцінку апарата АРЖМ-0.07-1 та порівняємо його з пристроєм без рефлектора.

Одиницею виміру часу в моделі є хвилина, що відповідає терміну найменшої затримки. Термін моделювання складає 20 хвилин. Загальний вигляд моделі наведено на рис. 6.

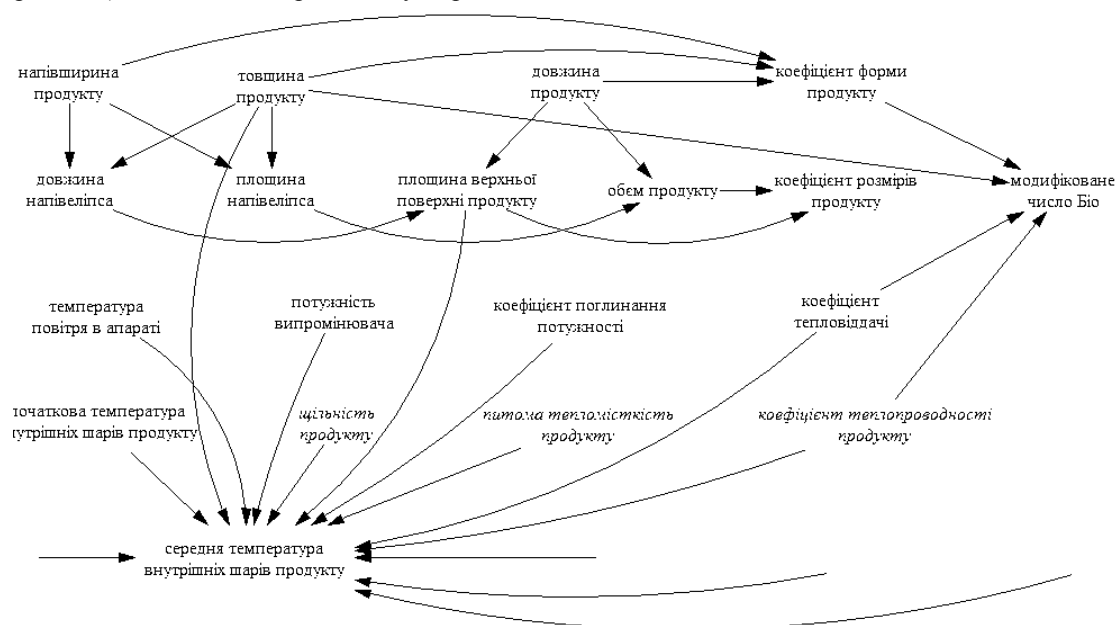


Рис. 1 – Імітаційна модель кінетики температури

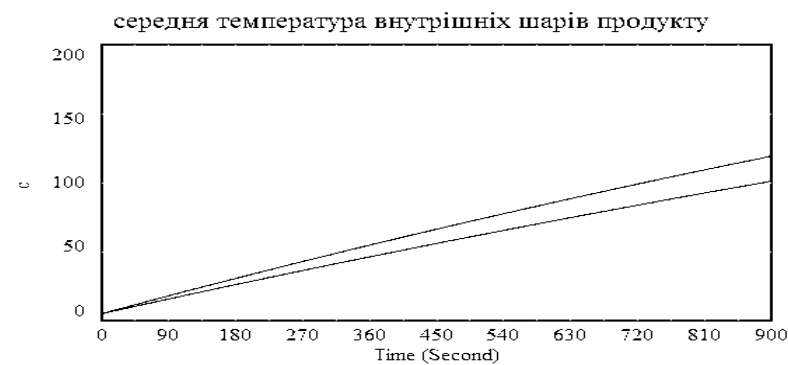


Рис. 2 – Зростання температури внутрішніх шарів: а – свинина; б – яловичина

Time (Second)	середня температура внутрішніх шарів продукту	середня температура внутрішніх шарів продукту
517	температура	74.5896
518	внутрішніх	74.7133
519	шарів	74.837
520	продукту"	74.9606
521	Runs:	75.0842
522	свинина	75.2077
523	яловичина	75.3313
524		75.4547
525		75.5782
526		75.7015
527		75.8249
528		75.9482
529		76.0714
530		76.1947
531		76.3179
532		76.441
533		76.5641
534		76.6872

Рис. 3 – Готовність м'ясного продукту: а – свинина; б – яловичина

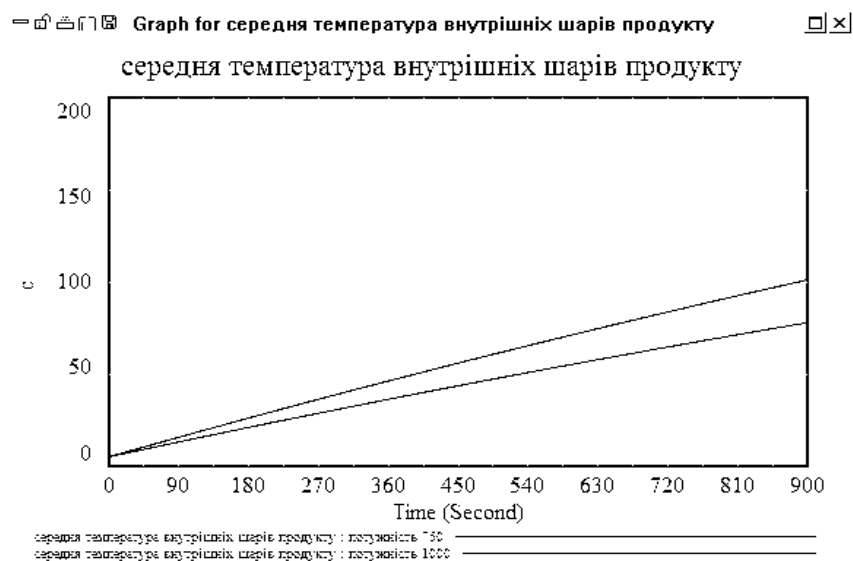


Рис. 4 – Зростання температури внутрішніх шарів:  
а – 1000 Вт; б – 750 Вт

Table Time Down

Time (Second)	"середня температура внутрішніх шарів продукту"	середня температура внутрішніх шарів продукту
627	температура	57.5262 74.2724
628	внутрішніх	57.6032 74.374
629	шарів	57.6802 74.4755
630	продукту"	57.7572 74.5771
631	Runs:	57.8341 74.6786
632	потужність	57.9111 74.78
633	750	57.988 74.8815
634	потужність	58.0649 74.9829
635	1000	58.1418 75.0843
636		58.2186 75.1857
637		58.2955 75.287
638		58.3723 75.3883
639		58.4491 75.4896
640		58.5259 75.5909
641		58.6026 75.6921

Рис. 5 – Готовність м'ясного продукту:  
а – 1000 Вт; б – 750 Вт

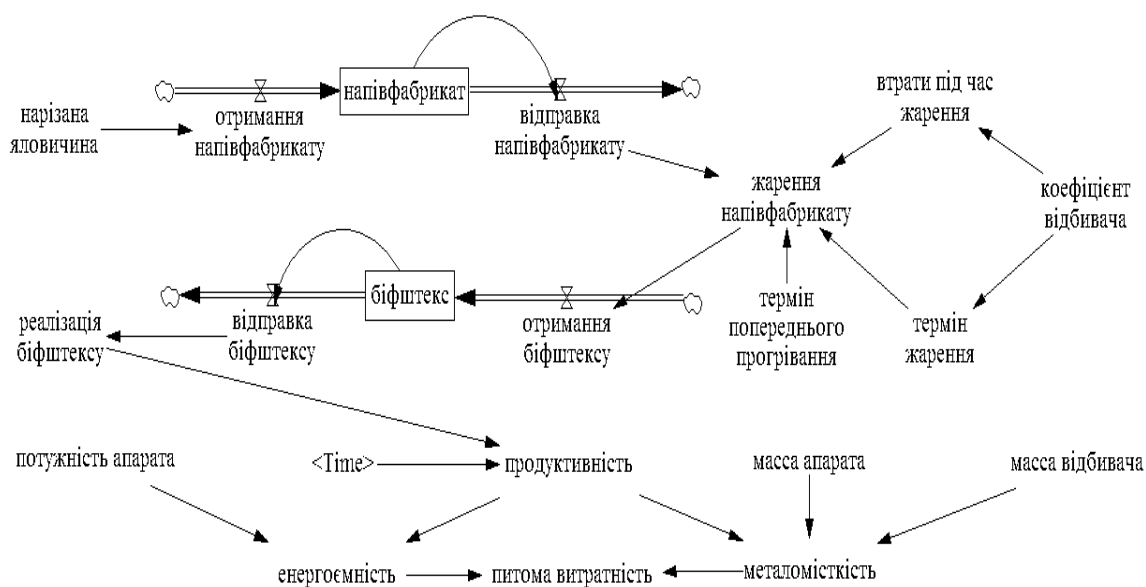


Рис. 6 – Імітаційна модель оцінки апарату

Припущення [8–10]:

- поставка яловичини є разовою пульсуючою;
  - затримки на операціях відповідають рекомендаціям з експлуатації;
  - терміни теплової обробки відповідають типовому обладнанню;
  - втрати на операціях відповідають експериментальним дослідженням;
  - залишок продукту відсутній;
  - якість продукту незмінно висока.
- Екзогенні керовані змінні [10–12]:
- масові компоненти (нарізана яловичина, маса апарата, маса відбивача);
  - енергетичні компоненти (коефіцієнт відбивача, потужність апарата, термін попереднього прогрівання).

Ендогенні керовані змінні [10–12]:

- втрати під час жарення становлять 33 %, помножені на коефіцієнт відбивача;
- термін жарення становить 15 хв, помножені на коефіцієнт відбивача;
- жарення напівфабрикату визначається фіксованою затримкою відправки напівфабрикату на суму термінів попереднього прогрівання та жарення з урахуванням втрат під час жарення;
- продуктивність визначається об'ємом реалізації біфштексу за годину;
- енергоємність визначається відношенням потужності апарата до продуктивності;
- металомісткість визначається відношенням суми мас апарата та відбивача до продуктивності;
- питома витратність визначається множенням енергоємності та металомісткості.

Моделним відгуком, або реакцією моделі була питома витратність. Всі фактори мають ефект взаємодії, тобто комбінованого впливу на реакцію моделі. Було використано наступні рівні факторів:

- нарізана яловичина складалася з двох шматків по 200 г кожний;
- маса апарата складала 3.5 кг;
- маса відбивача складала 0.5 кг;
- коефіцієнт відбивача становить 0.6, тобто відношення терміну жарення м'ясного напівфабрикату в апараті з відбивачем (9 хв) до терміну жарення у апараті без відбивача (15 хв);
- термін попереднього прогрівання апарату становить 2 хв;
- потужність обладнання становить 1 кВт.

Експеримент проводився для апарата без відбивача (коефіцієнт відбивача 1, маса відбивача 0 кг, Current 1) та апарата з відбивачем (коефіцієнт відбивача 0.6, маса відбивача 0.5 кг, Current 06).

Використання відбивача променевого потоку призводить до наступних переваг:

- збільшення реалізації біфштексу на  $0.32 / 0.27 - 1 = 1.2 - 1 = 0.2$ , тобто 20 % (рис. 7, 8);
- збільшення продуктивності на  $1.28 / 0.8 - 1 = 1.6 - 1 = 0.6$ , тобто 60 % (рис. 9, 10);
- зменшення енергоємності на  $1.25 / 0.78 - 1 = 1.6 - 1 = 0.6$ , тобто 60 % (рис. 11, 12);

– зменшення металомісткості на  $4.38 / 3.13 - 1 = 1.4 - 1 = 0.4$ , тобто 40 % (рис. 13, 14);

– зменшення питомої витратності на  $5.47 / 2.44 - 1 = 2.24 - 1 = 1.24$ , тобто 124 % (рис. 15, 16).

Характер та значення реалізації біфштексу наведено на рис. 7 та 8.

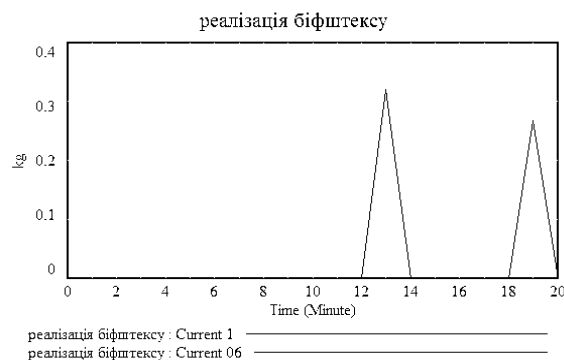


Рис. 7 – Характер реалізації біфштексу (кг):  
а – апарат без відбивача (Current 1),  
б – апарат з відбивачем (Current 06)

Time (Minute)	реалізація біфштексу "Current 1"	реалізація біфштексу "Current 06"
0	0	0
1	0	0
2	0	0
3	0	0
4	0	0
5	0	0
6	0	0
7	0	0
8	0	0
9	0	0
10	0	0
11	0	0
12	0	0
13	0	0.32
14	0	0
15	0	0
16	0	0
17	0	0
18	0	0
19	0.266667	0
20	0	0

Рис. 8 – Значення реалізації біфштексу (кг):  
а – апарат без відбивача (Current 1),  
б – апарат з відбивачем (Current 06)

Характер та значення продуктивності наведено на рис. 9 та 10.

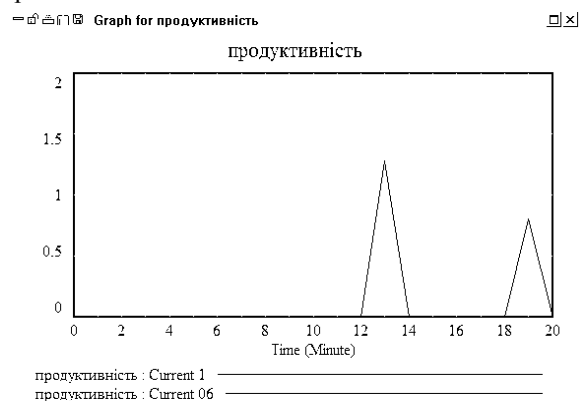


Рис. 9 – Характер продуктивності (кг / год):  
а – апарат без відбивача (Current 1),  
б – апарат з відбивачем (Current 06)

Time (Minute)	продуктивність	продуктивність
0	0	0
1	0	0
2	0	0
3	0	0
4	0	0
5	0	0
6	0	0
7	0	0
8	0	0
9	0	0
10	0	0
11	0	0
12	0	0
13	0	1.28
14	0	0
15	0	0
16	0	0
17	0	0
18	0	0
19	0.8	0
20	0	0

Рис. 10 – Значення продуктивності (кг / год):  
 а – апарат без відбивача (Current 1),  
 б – апарат з відбивачем (Current 06)

Характер та значення енергоємності наведено на рис. 11 та 12.

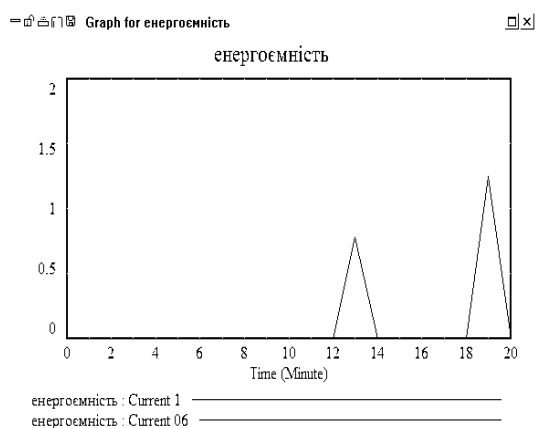


Рис. 11 – Характер енергоємності (кВт год / кг):  
 а – апарат без відбивача (Current 1),  
 б – апарат з відбивачем (Current 06)

Time (Minute)	енергоємність	енергоємність
0	0	0
1	0	0
2	0	0
3	0	0
4	0	0
5	0	0
6	0	0
7	0	0
8	0	0
9	0	0
10	0	0
11	0	0
12	0	0
13	0	0.78125
14	0	0
15	0	0
16	0	0
17	0	0
18	0	0
19	1.25	0
20	0	0

Рис. 12 – Значення енергоємності (кВт год / кг):  
 а – апарат без відбивача (Current 1),  
 б – апарат з відбивачем (Current 06)

Характер та значення металомісткості наведено на рис. 13 та 14, питомої витратності – на рис. 15 та 16.

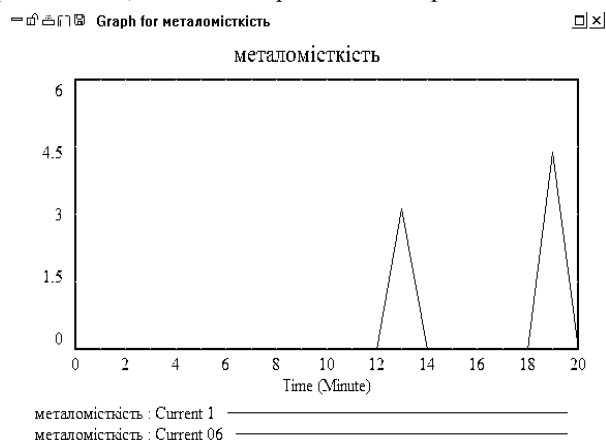


Рис. 13 – Характер металомісткості (кг год / кг):  
 а – апарат без відбивача (Current 1),  
 б – апарат з відбивачем (Current 06)

Time (Minute)	металомісткість	металомісткість
0	0	0
1	0	0
2	0	0
3	0	0
4	0	0
5	0	0
6	0	0
7	0	0
8	0	0
9	0	0
10	0	0
11	0	0
12	0	0
13	0	3.125
14	0	0
15	0	0
16	0	0
17	0	0
18	0	0
19	4.375	0
20	0	0

Рис. 14 – Значення металомісткості (кг год / кг):  
 а – апарат без відбивача (Current 1),  
 б – апарат з відбивачем (Current 06)

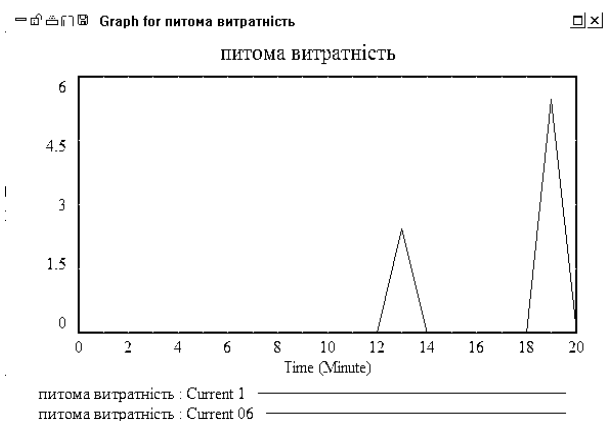


Рис. 15 – Характер питомої витратності (кВт кг год / кг):  
 а – апарат без відбивача (Current 1),  
 б – апарат з відбивачем (Current 06)

Time (Minute)	питома витратність	питома витратність
0	0	0
1	Runs:	0
2	Current 1	0
3	Current 06	0
4	0	0
5	0	0
6	0	0
7	0	0
8	0	0
9	0	0
10	0	0
11	0	0
12	0	0
13	0	2.44141
14	0	0
15	0	0
16	0	0
17	0	0
18	0	0
19	5.46875	0
20	0	0

Рис. 16 – Значення питомої витратності (кВт кг год / кг):

а – апарат без відбивача (Current 1),

б – апарат з відбивачем (Current 06)

**Висновки.** Імітаційне моделювання процесу інфрачервоного жарення м'ясних напівфабрикатів у апараті з рефлектором АРЖМ-0.07-1 уможливило наступні висновки:

– Інфрачервоне жарення м'ясних напівфабрикатів із потужністю випромінювача 1000 Вт забезпечує готовність свинини за 8.7 хв, яловичини – за 10.6 хв.

– Використання відбивача променевого потоку призводить до збільшення продуктивності на 60 %, скорочення енергоємності на 60 %, металомісткості на 40 %, питомої витратності на 124 %.

#### Список літератури

1. Потапов В. О., Сомов О. С. Наближена модель динаміки теплообмінних процесів // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства та торгівлі : Зб. наук. пр. Харків: ХДУХТ. 2008. № 1 (7). С. 380–388.
2. Рамазанов С. К., Скрипник В. О., Молчанова Н. Ю. Моделювання динаміки теплопровідності в процесі двостороннього жарення м'яса на основі нелінійної оптимізації // Технологічний аудит і резерви виробництва. 2015. Т. 3, № 3. С. 41–47.
3. Меркулова Т. В., Биткова Т. В., Кононова Е. Ю. Экономико-математическое моделирование: учебное пособие [2-е изд., до-раб.] Харьков: Харьковский национальный университет им. В. Н. Каразина, 2011. 276 с.
4. Лоу А. М., Кельтон В. Д. Имитационное моделирование. 3-е изд. СПб: ПИТЕР; Киев: Изд. группа BHV, 2004. 847 с.
5. Potapov V. (2013), The kinetics of transfer phenomena in the drying process: monograph, LAP LAMBERT Academic Publishing, Germany, 319 p.
6. Potapov V., Plevako V., Kostenko S., Pedorich I., Arkhipova V. (2016), «Physical and Analytical Modeling of Infrared Frying in ARJM-0.07-1 Apparatus», Industrial Technology and Engineering, vol. 3 (20), pp. 54–61.
7. Плевако В. П., Костенко С. М., Педорич І. П. Перевірка методики для визначення профілю відбивача променевого потоку // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2013. Т. 6, № 5 (66). С. 42–45.
8. Черевка О. І., Михайлова В. М., Бабкіна І. В. Процеси та апарати жаріння харчових продуктів: навч. посіб. Харк. держ. акад. техн. та орг. харчування. Харків: 2000. 332 с.: іл.; табл.

9. Перцевий Ф. В., Камсуліна Н. В., Колеснікова М. Б., Янчева М. О., Гурський П. В., Тищенко Л. М. Технологія продукції харчових виробництв: навч. посібник. Харків: ХДУХТ, 2006. 318 с.: табл.
10. Сафонова О. Н., Перцевой Ф. В., Гринченко О. А., Фощан А. Л., Пивоваров П. П., Богомолів А. В., Тищенко Л. Н. Системные исследования технологий переработки продуктов питания. Харьков: 2000. 200 с.
11. Плевако В. П., Костенко С. М., Лобов С. О. Експериментальне доведення методики визначення профілю відбивача // Обладнання та технології харчових виробництв: темат. зб. наук. пр. / ред. Шубін. О. О. Донец. нац. ун-т економіки і торгівлі ім. М. Туган-Барановського. 2012. Вип. 29. С. 48–52.
12. Плевако В. П., Костенко С. М., Педорич І. П. Нові технічні рішення в проектуванні обладнання для теплової обробки харчової сировини: монографія в 3 ч. Ч. 3. Підвищення ефективності теплового обладнання з інфрачервоним нагріванням / за заг. ред. Черевка О. І., Михайлова В. М. Харків: ХДУХТ, 2012. 130 с.

#### Reference (transliterated)

1. Potapov V. O., Somov O. S. Nablyzhena model dynamiky teploobminnykh protsesiv [Approximate model of dynamics of heat exchange processes] // Prohresyivni tekhnika ta tekhnolohii kharchovykh vyrobnytstv restorannoho hospodarstva ta torhivli [Progressive technology and technologies of food production of restaurant and trade]: Zb. nauk. pr. Kharkiv: KhDUKhT. 2008. № 1 (7). pp. 380–388.
2. Ramazanov S. K., Skrypnyk V. O., Molchanova N. Yu. Modeliuvannia dynamiky teploprovodnosti v protsesi dvostoronnogo zharennia m'iasa na osnovi nelineinnoi optimizatsii [Simulation of heat conductivity in the process of two-way frying of meat based on nonlinear optimization] // Tekhnologicheskii audit i rezervy proizvodstva. 2015, vol. 3, no. 3. pp. 41–47.
3. Merkulova T. V., Bitkova T. V., Kononova E. Yu. Ekonomiko-matematicheskoye modelirovaniye [Economic and Mathematical Modeling]: uchebnoye posobiye [2-e izd., dorab.] Kharkov: Kharkovskiy natsionalnyy universitet im. V. N. Karazina, 2011. 276 p.
4. Lou A. M., Kelton V. D. Imitatsionnoye modelirovaniye [Imitation modeling]. 3-e izd. SPb: PITER; Kiev: Izd. gruppa BHV, 2004. 847 p.
5. Potapov V. (2013), The kinetics of transfer phenomena in the drying process: monograph, LAP LAMBERT Academic Publishing, Germany, 319 p.
6. Potapov V., Plevako V., Kostenko S., Pedorich I., Arkhipova V. (2016), «Physical and Analytical Modeling of Infrared Frying in ARJM-0.07-1 Apparatus», Industrial Technology and Engineering, vol. 3 (20), pp. 54–61.
7. Plevako V. P., Kostenko S. M., Pedorych I. P. Perevirka metodyky dlia vyznachennia profilu vidbyvacha promenevoho potoku [Test method for determining the profile of reflector beam] // Vostochno-Evropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy. 2013, vol. 6, № 5 (66). pp. 42–45.
8. Cherevko O. I., Mykhailov V. M., Babkina I. V. Protsey ta aparaty zharinnia kharchovykh produktiv [Processes and appliances for frying food]: navch. posib. Khark. derzh. akad. tekhnol. ta orh. kharchuvannia. Kharkiv: 2000. 332 p.: il.; tabl.
9. Pertseyvi F. V., Kamsulina N. V., Kolesnikova M. B., Yancheva M. O., Hurskyi P. V., Tishchenko L. M. Tekhnolohiiia produktsii kharchovykh vyrobnytstv [Technology of products of food production]: navch. posibnyk. Kharkiv: KhDUKhT, 2006. 318 p.: tabl.
10. Safonova O. N., Pertsevoi F. V., Hrynenchenko O. A., Foshchan A. L., Pyvovarov P. P., Bohomolov A. V., Tyschenko L. N. Sistemnyye issledovaniya tekhnologiy pererabotki produktov pitaniya [System studies of food processing technology]. Kharkov: 2000. 200 p.
11. Plevako V. P., Kostenko S. M., Lobov S. O. Eksperymentalne dovedennia metodyky vyznachennia profilu vidbyvacha [Experimental proof of the method of determining the profile of the reflector] // Obladnannia ta tekhnolohii kharchovykh vyrobnytstv [Equipment and technology of food production]: temat. zb. nauk. pr.

/ red Shubin. O. O. Donets. nats. un-t ekonomiky i torhivli im. M. Tuhon-Baranovskoho. 2012. Vyp. 29. pp. 48–52.

12. Plevako V. P., Kostenko S. M., Pedorych I. P. Novi tekhnichni rishennia v proektuvanni obladnannia dlia teplovoi obrobky kharchovoi syrovyny [New technical solutions in the design of equipment for the heat treatment of food raw materials]: monohrafiia v 3 ch. Ch. 3. Pidvyshchennia efektyvnosti teplovoho obladnannia z infrachervonym nahrivanniam [Increasing the

efficiency of thermal equipment with infra-red heating] / za zah. red. Cherevka O. I., Mykhailova V. M. Kharkiv: KhDUKht, 2012. 130 p.

Надійшла (received) 19.10.2018

#### **Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors**

**Потанов Володимир Олексійович (Потанов Владимир Алексеевич, Potapov Volodymyr)** – доктор технічних наук, професор, кафедра підготовки та перепідготовки фахівців холодильної та торговельної галузі, Харківський державний університет харчування та торгівлі, м. Харків, Україна, ORCID: [http:// orcid.org/ 0000-0002-3645-5600](http://orcid.org/0000-0002-3645-5600), e-mail: potapov\_hduht@kharkov.com

**Костенко Станіслав Миколайович (Костенко Станислав Николаевич, Kostenko Stanislav)** – старший вкладач, кафедра підготовки та перепідготовки фахівців холодильної та торговельної галузі, Харківський державний університет харчування та торгівлі, м. Харків, Україна, ORCID: [http:// orcid.org/ 0000-0003-0268-8008](http://orcid.org/0000-0003-0268-8008), e-mail: dlyastasa@gmail.com

**Педорич Ірина Петрівна (Педорич Ирина Петровна, Pedorych Iryna)** – аспірант, кафедра підготовки та перепідготовки фахівців холодильної та торговельної галузі, Харківський державний університет харчування та торгівлі, м. Харків, Україна, ORCID: [http:// orcid.org/ 0000-0003-2058-0359](http://orcid.org/0000-0003-2058-0359), e-mail: pedorichirina@gmail.com.